



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 103 10 356.2

**Anmeldetag:** 10. März 2003

**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

**Bezeichnung:** Magnetresonanzgerät mit einem Grundfeldmagneten und wenigstens einer Gradientenspule

**IPC:** G 01 R 33/385

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 24. Juli 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ebert'.

Ebert

## Beschreibung

Magnetresonanzgerät mit einem Grundfeldmagneten und wenigstens einer Gradientenspule

5

Die Erfindung betrifft ein Magnetresonanzgerät.

Die Magnetresonanztechnik ist eine bekannte Technik unter anderem zum Gewinnen von Bildern eines Körperinneren eines Untersuchungsobjekts. Dabei werden in einem Magnetresonanzgerät einem statischen Grundmagnetfeld, das von einem Grundfeldmagneten erzeugt wird, schnell geschaltete Gradientenfelder überlagert, die von einem Gradientenspulensystem erzeugt werden. Ferner umfasst das Magnetresonanzgerät ein Hochfrequenzsystem, das zum Auslösen von Magnetresonanzsignalen Hochfrequenzsignale in das Untersuchungsobjekt einstrahlt und die ausgelösten Magnetresonanzsignale aufnimmt, auf deren Basis Magnetresonanzbilder erstellt werden.

Zum Erzeugen von Gradientenfeldern sind in Gradientenspulen des Gradientenspulensystems entsprechende Ströme einzustellen. Dabei betragen die Amplituden der erforderlichen Ströme bis zu mehreren 100 A. Die Stromanstiegs- und -abfallraten betragen bis zu mehreren 100 kA/s. Auf diese sich zeitlich verändernden Ströme in den Gradientenspulen wirken bei vorhandenem Grundmagnetfeld in der Größenordnung von 1 T Lorentzkkräfte, die zu Schwingungen des Gradientenspulensystems führen. Diese Schwingungen werden über verschiedene Ausbreitungswege an die Oberfläche des Magnetresonanzgeräts weitergegeben. Dort werden die Mechanikschwingungen in Schall-schwingungen umgesetzt, die schließlich zu an sich unerwünschtem Lärm führen. Des Weiteren können die Lorentzkkräfte auch noch zu einer an sich unerwünschten Starrkörperbewegung des Gradientenspulensystems gegenüber dem übrigen Magnetresonanzgerät führen.

In der DE 44 32 747 A1 ist eine prinzipielle Verringerung von Schwingungen des Gradientenspulensystems durch eine aktive Maßnahme beschrieben. Dazu ist in oder am Gradientenspulensystem eine Einrichtung, insbesondere beinhaltend elektrostriktive Elemente, angeordnet. Mit dieser Einrichtung können Kräfte erzeugt werden, die den Schwingungen des Gradientenspulensystems entgegenwirken, so dass ein Verformen des Gradientenspulensystems im wesentlichen verhindert wird. Diese Lösung ist aber insbesondere wegen ihres hohen Aufwands im Zusammenhang mit den elektrostriktiven Elemente, deren Anordnung und deren Regelung kostenintensiv.

In der DE 199 03 627 A1 ist ein Verfahren zum Betrieb eines Magnetresonanzgeräts beschrieben, bei dem um die Resonanzfrequenzen eines Gradientenspulensystems herum verbotene Frequenzbänder definiert werden und die Gradientenspulenströme im Rahmen von Pulssequenzen derart gesteuert werden, dass sie keine spektralen Komponenten innerhalb dieser verbotenen Frequenzbänder aufweisen, so dass eine Anregung von Lärmspitzen vermieden wird. Diese Lösung stellt aber auch keinen generellen Ausweg dar, da sie nur die Resonanzfrequenzbereiche beeinflusst.

Aus der DE 198 29 298 A1 ist schließlich ein Gradientenspulensystem bekannt, mit dem nur ein Teil eines Körpers eines Patienten, beispielsweise dessen Kopf, abgebildet werden kann. Das Gradientenspulensystem umfasst dabei eine asymmetrische Gradientenspule, die mit einem drehmomentkompensierten Leiterdesign aufgebaut ist.

Eine Aufgabe der Erfindung ist es ein verbessertes Magnetresonanzgerät zu schaffen, bei dem unter anderem eine geringe Lärmemission erzielt wird.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch den Gegenstand des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Gemäß Anspruch beinhaltet ein Magnetresonanzgerät folgende Merkmale:

- Ein Grundfeldmagnet zum Erzeugen eines Grundmagnetfelds, das innerhalb eines Abbildungsvolumens des Magnetresonanzgeräts möglichst ausschließlich eine in einer vorgebbaren Richtung orientierte Hauptkomponente aufweist,
- wenigstens eine Gradientenspule, die in einem Bereich des Grundmagnetfelds angeordnet ist, in dem das Grundmagnetfeld wenigstens eine zur Hauptkomponente senkrechte Begleitkomponente aufweist, und
- die Leiter der Gradientenspule sind derart angeordnet, dass bei Fluss eines elektrischen Stroms in den Leitern ein durch die Hauptkomponente bewirktes, auf einen Teil der Gradientenspule wirkendes Drehmoment wenigstens teilweise durch ein durch die Begleitkomponente bewirktes Drehmoment kompensiert ist.

Durch die damit bewirkbare Kompensation von Biegemomenten wird die mechanische Schwingungsneigung der Gradientenspule direkt an der Entstehungsstelle reduziert, womit eine hohe lärmreduzierende Wirkung erzielt wird und Einschränkungen bisheriger Lösungsansätze überwunden werden. Die Erfindung beruht dabei auf der Erkenntnis, dass in dem Bereich, in dem üblicherweise die Leiter der Gradientenspulen angeordnet sind, das Grundmagnetfeld bereits eine hinreichend große Begleitkomponente senkrecht zur Hauptkomponente aufweist und die Begleitkomponente in Verbindung mit einer entsprechenden Leiteranordnung der Gradientenspulen zum Kompensieren von Drehmomenten nutzbar ist. Eine erfindungsgemäß gestaltete Gradientenspule weist dabei gegenüber einer vergleichbaren konventionellen Gradientenspule bei ansonsten gleichen Eigenschaften lediglich eine um wenige Prozentpunkte vergrößerte Induktivität auf.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung ist die Gradientenspule eine transversale Gradientenspule eines Gradientenspulensys-

tems für ein Magnetresonanzgerät mit einem im Wesentlichen zylinderförmigen Patientenaufnahmeraum. Die erfindungsgemäße Gestaltung der transversalen Gradientenspule ist besonders vorteilhaft, da die stromdurchflossenen sattelartigen

5 Teilspulen der transversalen Gradientenspule in Verbindung mit der Hauptkomponente Drehmomente hervor, die das Gradientenspulensystem auf Biegung beanspruchen, und die Steifigkeit des Gradientenspulensystems gegenüber Biegemomenten vergleichsweise gering ist, so dass ohne die erfindungsgemäße

10 Ausgestaltung große elastische Auslenkungen und damit Lärm entstehen würden. Außerdem liegt die fundamentale Eigenfrequenz des Gradientenspulensystems meist in dem Bereich starker spektraler Komponenten des zugehörigen Gradientenspulenstroms. Die damit mögliche Anregung mechanischer Resonanzen

15 würde ohne die erfindungsgemäße Ausgestaltung zu einer nochmaligen wesentlichen Lärmzunahme führen. Dahingegen belasten die in Verbindung mit der Hauptkomponente auftretenden Kräfte einer longitudinalen Gradientenspule das Gradientenspulensystem im Wesentlichen radial. Wegen der hohen Steifigkeit des

20 Gradientenspulensystems gegen derartige Belastungen treten nur vergleichsweise geringe elastische Verformungen auf, so dass die akustische Schallabstrahlung üblicherweise gering bleibt. Außerdem liegen alle Resonanzfrequenzen meist ausreichend weit oberhalb des größten Teils des Leistungsspektrums

25 des zugehörigen Gradientenspulenstroms. Dabei ist eine durch die Begeleitkomponente des Grundmagnetfelds hervorgerufene Längsschubkraft durch eine geeignete Positionierung der Leiter für einen gegebenen Grundfeldmagneten leicht beseitigbar.

30 Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispielen der Erfindung anhand der Figuren. Dabei zeigen:

Figur 1 einen Längsschnitt durch eine supraleitende Spule und  
35 eine Gradientenspule eines Magnetresonanzgeräts und

Figuren 2, 3 und 4 azimutale und axiale Ströme in einem Grundmagnetfeld mit einer axialen Hauptkomponente und einer radialen Begleitkomponente.

5 Die Figur 1 zeigt als ein Ausführungsbeispiel der Erfindung einen Längsschnitt durch eine supraleitende Spule 10 eines Grundfeldmagneten und eine transversale Gradientenspule eines Magnetresonanzgeräts mit einem tunnelartigen Patientenaufnahmeraum. Dabei sind aus Gründen der Übersichtlichkeit die supraleitende Spule 10 und die transversale Gradientenspule von übrigen Komponenten des Magnetresonanzgeräts freigeschnitten dargestellt. Die übrigen Komponenten umfassen beispielsweise einen Heliumbehälter, Kälteschilde und einen Vakuumbehälter des Grundfeldmagneten sowie weitere Gradientenspulen, Schirmspulen, Shimspulen und einen Harzverguss eines Gradientenspulensystems sowie ein Hochfrequenzantennensystem. Von der supraleitenden Spule 10 sind exemplarisch vier ringartige Windungen dargestellt. Die transversale Gradientenspule umfasst eine linke und eine rechte Spulenhälfte mit je zwei sich gegenüberliegenden sattelförmigen Teilspulen 21 und 22 sowie 28 und 29 je Spulenhälfte. Wiederum aus Gründen der Übersichtlichkeit ist je Teilspule 21, 22, 28 und 29 exemplarisch nur eine Windung dargestellt.

25 Bei einem entsprechenden Stromfluss in der supraleitenden Spule 10 erzeugt der Grundfeldmagnet wenigstens innerhalb eines Abbildungsvolumens 15 in Richtung einer Zylinderhauptachse, die durch eine Verbindung der Mittelpunkte der ringartigen Windungen der supraleitenden Spule 10 entsteht, ein möglichst homogenes statisches Grundmagnetfeld. Dabei kennzeichnet das Symbol  $\odot$  einen aus der Zeichnungsebene heraus-tretenden Stromfluss und das Symbol  $\otimes$  einen in die Zeichnungsebene eintretenden Stromfluss. In dem Bereich, in dem die Windungen der Teilspulen 21, 22, 28 und 29 angeordnet sind, ist das Grundmagnetfeld nicht mehr homogen und weist neben einer Hauptkomponente  $B_z$  in Richtung der Zylinderhauptachse auch eine radial gerichtete Begleitkomponente  $B_r$  auf.

Aufgrund der Hauptkomponente  $B_z$  des Grundmagnetfelds wirken im Bereich der Schnittebene der Figur 1 auf die Teilspulen 21 und 22 der rechten Spulenhälfte die mit  $F_{Bz}$  bezeichneten Kräfte, die bezüglich einem Schwerpunkt 24 der rechten Spulenhälfte ein Drehmoment  $M_z$  bewirken. Zur richtungsmäßigen Bestimmung der Kräfte  $F_{Bz}$  ist dabei ein Stromfluss in den Teilspulen 21 und 22 angenommen, der durch die bei der supra-  
leitenden Spule 10 erklärten Symbole  $\odot$  und  $\otimes$  festgelegt ist. Gemäß der Erfindung sind die Leiter der Teilspulen 21 und 22 des Weiteren derart angeordnet, dass aufgrund der radialen Begleitkomponente  $B_r$  des Grundmagnetfelds auf die stromdurchflossenen Teilspulen 21 und 22 im Bereich der Schnittebene Kräfte  $F_{Br}$  wirken, die bezüglich dem Schwerpunkt 24 ein Drehmoment  $M_r$  erzeugen, das dem Drehmoment  $M_z$  möglichst vollständig entgegenwirkt. Damit wird für die beispielsweise in einem hohlzylinderförmigen Gießharzverguss angeordnete Spulenhälfte mit Vorteil eine Drehmomentenkompensation erreicht. Entsprechendes gilt für die Teilspulen 28 und 29

Das vorausgehend Beschriebene ist auf eine aktiv geschirmte Gradientenspule, die eine Primärspule und eine Schirmspule umfasst, entsprechend anwendbar, wobei neben den Leitern der Primärspule als der sozusagen eigentlichen Gradientenspule die weiteren Leiter der Schirmspule zu berücksichtigen sind. Für die Kompensation sind dabei die Summen der sowohl von der Primär- als auch der Schirmspule herrührenden Drehmomente und Kräfte zu betrachten.

Die vorausgehend beschriebene Leiteranordnung der Gradientenspule geht von einem fest vorgegebenen Verlauf der Begleitkomponente  $B_r$  aufgrund eines vorher durchgeführten Grundfeldmagnetdesigns aus. In anderen Ausführungsformen können natürlich auch Grundfeldmagnet und Gradientenspule aufeinander abgestimmt entworfen werden, so dass der Verlauf der Begleitkomponente  $B_r$  durch das Design des Grundfeldmagneten in Grenzen aussteuerbar ist.

Im Folgenden ist eine Vorgehensweise zum Bestimmen der drehmomentenkompensierten Leiteranordnung der Gradientenspule beschrieben. Dazu ist es für die nachfolgenden Überlegungen zweckmäßig, die transversale Gradientenspule in Ringe zu zerlegen, deren Ströme jeweils rein azimutale und rein axiale Komponenten besitzen. Da die transversalen Gradientenspulen einen transversalen Gradienten senkrecht zur Zylinderhauptachse erzeugen, ist der azimutale Strom  $I_k$  in jedem Ring im Wesentlichen proportional dem Kosinus und die axialen Ströme  $I_j$  dem Sinus des Azimutwinkels  $\varphi$ . Die im Nachfolgenden betrachteten Kräfte werden dabei im Wesentlichen von den azimutalen Strömen  $I_k$  hervorgerufen. Besitzt ein Ring  $k$  den Radius  $r_k$  und die axiale Position  $z_k$ , so ist die vom azimutalen Strom  $I_k$  und der Hauptkomponente  $B_z(r_k; z_k)$  des Grundmagnetfelds verursachte Kraft  $F_{z;k}$  in Gradientenrichtung:

$$F_{z;k} = I_k r_k B_z \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi = \pi I_k r_k B_z$$

Die Figur 2 veranschaulicht dies entsprechend. Diese Kraft  $F_{z;k}$  verursacht ein Drehmoment:

$$M_{z;k} = F_{z;k} z_k = \pi I_k r_k z_k B_z$$

Das von der radialen Begleitkomponente  $B_r(r_k; z_k)$  des Grundmagnetfelds bezüglich der azimutalen Ströme  $I_k$  über die Querkraft  $F_{r;k}$  herrührende Drehmoment  $M_{r;k}$  um eine Querachse senkrecht zur Gradientenrichtung ist:

$$M_{r;k} = F_{r;k} r_k = I_k r_k^2 B_r \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi = \pi I_k r_k^2 B_r$$

Die Figur 3 veranschaulicht dies entsprechend.

Damit ist das effektive Gesamtdrehmoment  $M_{azi}$  der azimutalen Ströme  $I_k$ :

$$M_{azi} = \pi \sum_k I_k r_k (r_k B_r + z_k B_z)$$

Die Längsströme  $I_j$  erzeugen bei Vorhandensein der radialen Begleitkomponente  $B_r$  des Grundmagnetfelds ebenfalls eine Querkraft  $F_j$ :

$$F_j = -\Delta z B_r \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi \sum_{j < k} I_j = -\pi \Delta z B_r \sum_{j < k} I_j$$

- 5 Die Figur 4 veranschaulicht dies entsprechend. Dabei ist  $\Delta z$  die dem Längsstrom  $I_j$  zugrundeliegende Leiterlänge. Die Querkraft  $F_j$  ruft einen zusätzlichen Drehmomentbeitrag  $M_j$  hervor:

$$M_j = F_j z_k = -\pi z_k \Delta z B_r \sum_{j < k} I_j$$

- 10 Um die Querkräfte  $F_{r,k}$  und  $F_j$  der transversalen Gradientenspule gegeneinander zu kompensieren, ist als zusätzliche Randbedingung in die Optimierung der Stromverteilung der Gradientenspule folgender Ausdruck aufzunehmen:

$$\sum_k \left( I_k r_k B_z - \Delta z B_r \sum_{j < k} I_j \right) = 0$$

15

Der fundamentale Biegeschwingungsmodus wird durch die entgegengerichteten Summendrehmomente der beiden Spulenhälften, d.h. durch die Belastung des Spulenquerschnitts in der Ebene  $z = 0$  angeregt. Zur Verringerung des Biegemoments ist es nötig, das Gesamtdrehmoment jeder Spulenhälfte für sich zu reduzieren bzw. zu beseitigen. Das vorgenannte Summendrehmoment ist also beispielsweise über alle  $k$  einer Spulenhälfte zu bilden. Bei der Optimierung der Gradientenspule ist damit eine zusätzliche Randbedingung einzuführen:

20

$$25 \quad \sum_k \left( I_k r_k (r_k B_r + z_k B_z) - z_k \Delta z B_r \sum_{j < k} I_j \right) = 0$$

Die Festlegung des Bezugspunkts  $z = 0$  hinsichtlich der Drehmomente  $M_{z,k}$  und  $M_{r,k}$  ist irrelevant, wenn auch die Querkräfte  $F_{r,k}$  und  $F_j$  kompensiert werden. Anderenfalls liegt es nahe, den Schwerpunkt der entsprechenden Spulenhälfte zu verwenden, da die magnetischen Kräfte im interessierenden Frequenzbe-

30

reich hauptsächlich durch Trägheitskräfte aufgefangen werden und dann kein Summendrehsmoment verursachen.

Basierend auf dem vorausgehend Beschriebenen ist die Leiteranordnung der Gradientenspule eineindeutig bestimmbar. In  
5 anderen Ausführungsformen kann die Anordnung der Leiter auch über andere Designverfahren, beispielsweise das in der DE 100 11 034 A1 beschriebene bestimmt werden, wobei dazu vorausgehend beschriebene Bedingungen entsprechend berücksichtigt  
10 werden.

## Patentansprüche

1. Magnetresonanzgerät, beinhaltend folgende Merkmale:

- Ein Grundfeldmagnet zum Erzeugen eines Grundmagnetfelds,  
5 das innerhalb eines Abbildungsvolumens des Magnetresonanz-  
geräts möglichst ausschließlich eine in einer vorgebbaren  
Richtung orientierte Hauptkomponente aufweist,
- wenigstens eine Gradientenspule, die in einem Bereich des  
Grundmagnetfelds angeordnet ist, in dem das Grundmagnetfeld  
10 wenigstens eine zur Hauptkomponente senkrechte Begleitkom-  
ponente aufweist, und
- die Leiter der Gradientenspule sind derart angeordnet, dass  
bei Fluss eines elektrischen Stroms in den Leitern ein  
durch die Hauptkomponente bewirktes, auf einen Teil der  
15 Gradientenspule wirkendes Drehmoment wenigstens teilweise  
durch ein durch die Begleitkomponente bewirktes Drehmoment  
kompensiert ist.

2. Magnetresonanzgerät nach Anspruch 1, wobei die Haupt- und  
20 die Begleitkomponente im Bereich der Leiter eine vergleichba-  
re Größenordnung aufweisen.

3. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 1 oder 2,  
wobei die Leiter in einem im Wesentlichen hohlzylinderförmigen  
Bereich angeordnet sind.  
25

4. Magnetresonanzgerät nach Anspruch 3, wobei die Hauptkompo-  
nente in Richtung der Hohlzylinderhauptachse des hohlzylind-  
derförmigen Bereichs orientiert ist.

5. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 3 oder 4,  
wobei die Gradientenspule in axialer Richtung des hohlzylind-  
derförmigen Bereichs in zwei Teilspulen untergliedert ist.

6. Magnetresonanzgerät nach Anspruch 5, wobei in axialer  
35 Richtung ein räumlicher Verlauf der Begleitkomponente im Be-

reich der Leiter einer der Teilspulen einen Vorzeichenwechsel aufweist.

7. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 5 oder 6,  
5 wobei wenigstens eine der Teilspulen bezüglich ihres Schwerpunkts zum Kompensieren der Drehmomente gestaltet ist.

8. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei die Leiter wenigstens einer der Teilspulen derart angeordnet sind, dass bei Fluss des elektrischen Stroms in den Leitern die auf die Leiter senkrecht zur axialen Richtung wirkenden Kräfte sich wenigstens teilweise gegeneinander aufheben.  
10

9. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 3 bis 8, wobei die Gradientenspule eine transversale Gradientenspule ist.  
15

10. Magnetresonanzgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Gradientenspule eine aktiv geschirmte Gradientenspule ist.  
20

11. Magnetresonanzgerät nach Anspruch 10, wobei die aktiv geschirmte Gradientenspule eine Primärspule und eine Schirmspule umfasst.  
25

## Zusammenfassung

Magnetresonanzgerät mit einem Grundfeldmagneten und wenigstens einer Gradientenspule

5

Ein Magnetresonanzgerät beinhaltet folgende Merkmale:

- Ein Grundfeldmagnet zum Erzeugen eines Grundmagnetfelds, das innerhalb eines Abbildungsvolumens des Magnetresonanzgeräts möglichst ausschließlich eine in einer vorgebbaren Richtung orientierte Hauptkomponente aufweist,
- wenigstens eine Gradientenspule, die in einem Bereich des Grundmagnetfelds angeordnet ist, in dem das Grundmagnetfeld wenigstens eine zur Hauptkomponente senkrechte Begleitkomponente aufweist, und
- die Leiter der Gradientenspule sind derart angeordnet, dass bei Fluss eines elektrischen Stroms in den Leitern ein durch die Hauptkomponente bewirktes, auf einen Teil der Gradientenspule wirkendes Drehmoment wenigstens teilweise durch ein durch die Begleitkomponente bewirktes Drehmoment kompensiert ist.

Figur 1

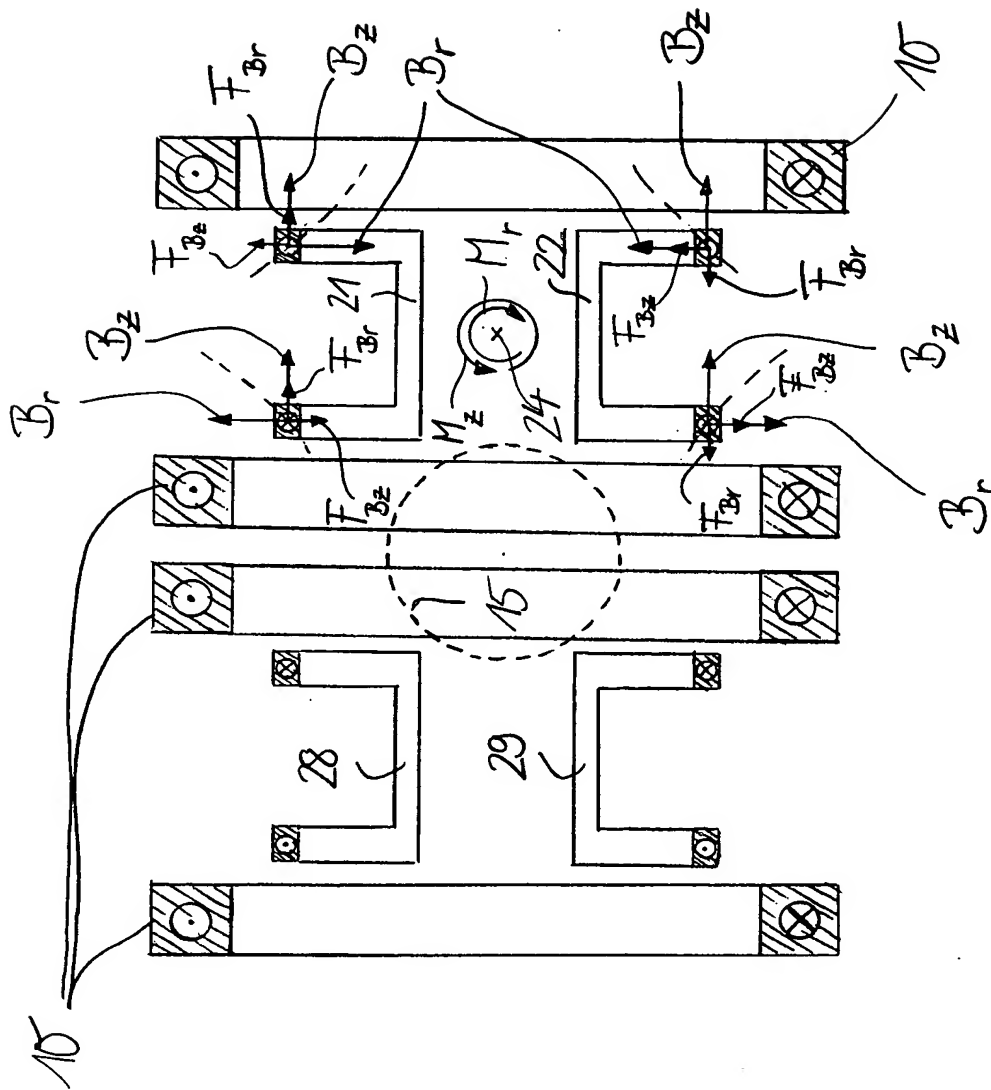


Fig 1

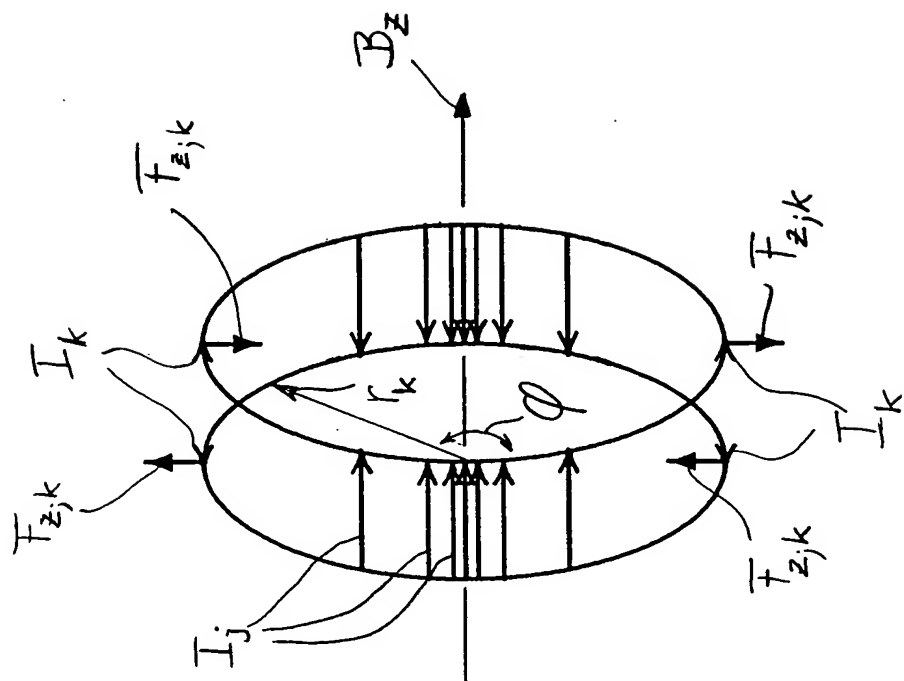


FIG 2

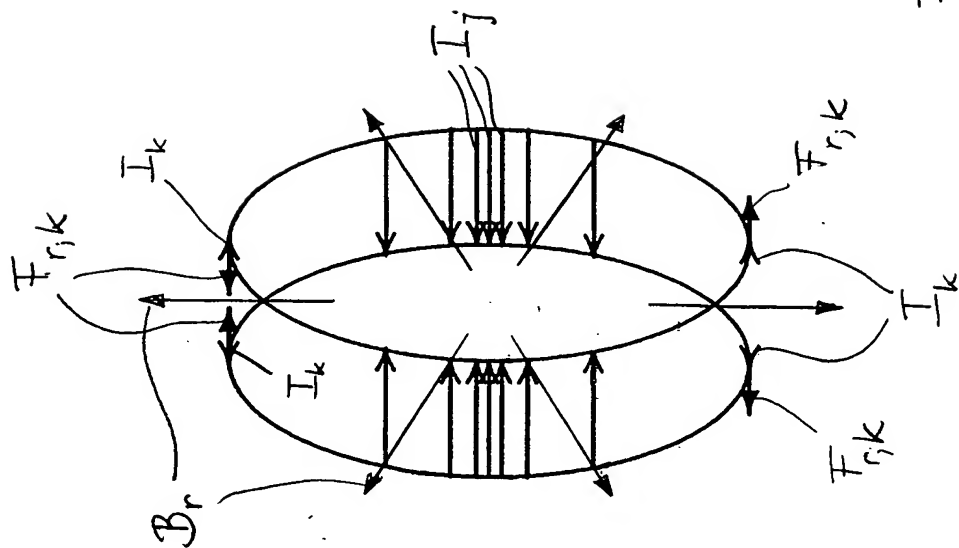


FIG 3

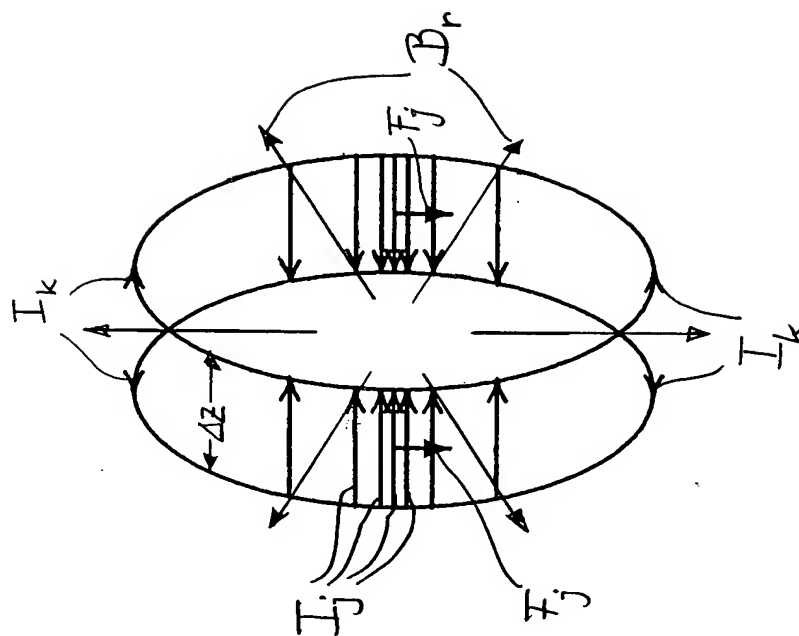


FIG 4